

## 超微細半導体製造プロセスに向けた 熱式マスフローコントローラの開発

Development of Thermal Mass Flow Controller for  
Further Miniaturized Semiconductor Devices

瀧尻 興太郎

Kotaro TAKIJIRI

岡野 浩之

Hiroyuki OKANO

家城 篤史

Atsushi IEKI

マスフローコントローラ(MFC)は半導体市場の拡大と微細化に伴い進化を遂げている。2000年代、顧客の在庫削減の要求から1台のMFCでガス種や流量レンジを変更できるマルチガス・マルチレンジ機能(MR/MG)を有したMFCが開発され標準となった。2010年代にはガス供給ラインのコスト削減要求から供給側の圧力計と圧力レギュレータの機能を有したプレッシャーインセンシティブMFC(PI-MFC)が半導体プロセス市場で標準となっている。本稿ではさらなる半導体デバイスの微細化や立体構造化に伴うガス供給系への要求から次世代のMFCの開発について述べる。

Mass Flow Controller (MFC) has been evolved for semiconductor industry expansion and micro-fabrication. Since the year 2000, many multi-range, multi-gas configurable type MFC's have been developed and standardized in order to reduce the number of configurations of MFC gas species and flow ranges which were typical required in the customer's inventory. Since 2010, the "Pressure Insensitive MFC" (PI-MFC) was developed for further reduced-cost semiconductor processes; which has inlet pressure monitoring and high flow stability without the need for a separate inlet pressure regulator. This paper expresses a development of a next generation of thermal MFC, beyond PI-MFC, for nanometer-scale semiconductor processes.

### はじめに

近年、あらゆる物に半導体デバイスが搭載されインターネットに接続されるInternet of Things (IoT)が提唱されており、大量のデータを扱うためのデータセンターやサーバー需要が高まっている。半導体市場ではSolid State Disk (SSD)などのメモリ需要の増加により、3D NANDのメモリーセル高層化が進んでいる。またスマートフォンなどで使用されるプロセッサはさらに高速化・省電力化が求められ、3次元構造のFinFETなどの開発が進んでいる。半導体デバイスではナノメートルスケールの複雑な構造となっており半導体製造プロセスでは原子レベルの制御が求められ、原子一層分を成膜するAtomic layer deposition (ALD)や除去を行うAtomic layer etching (ALE)などのプロセスが重要となっている。

最先端プロセスのマスフローコントローラ(MFC)の開発において、ナノメートルスケールの超微細化に伴いプロセスガスの質量流量に対して高い精度・再現性が求められる。流量応答性に対してはプロセスによって要求が異なる。

り、高速応答性を求めるプロセスや安定性を重視するプロセスなど要求が多様化している。さらに半導体製造のコスト競争力や歩留まりを上げる為に、装置間の機差を小さく抑えることが重要となっており、MFCの流量精度や応答性能の器差も小さくすることが課題となっている。また、ナノメートルレベルのパーティクルがデバイスの欠陥につながる為、MFCの接ガス部はガスが残留しにくいデッドボリュームを抑えたパーティクルフリー構造が望ましい。

製造装置構成も大きく変化しており、次世代の通信プラットフォームとしてEtherCAT (Figure 1)の採用が進んでいる。高速なデータ通信が可能となりMFCの様々な内部状態のデータをリアルタイムで収集することが可能となり、MFCの状態を監視しプロセスで発生するトラブルを未然防止する動きが進んでいる。

半導体製造装置に搭載されているMFCは熱方式マスフローコントローラ(TMFC)と差圧方式マスフローコントローラ(PMFC)の2つの測定原理が主流となっており、本稿ではTMFCのナノメートルレベルプロセス向けのプラッ

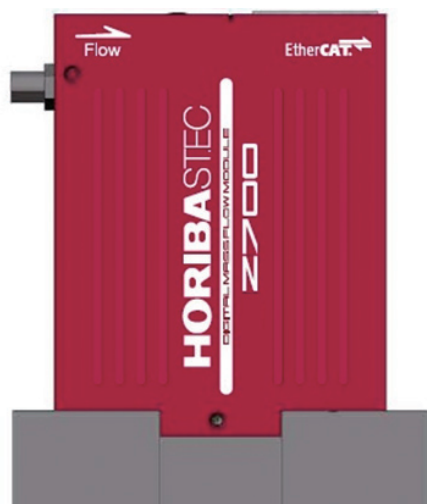


Figure 1 EtherCAT mass flow controller

トフォームについて述べる。まずTMFCとPMFCの原理・特徴を比較しTMFCの開発課題について述べる。

## TMFC・PMFCの原理と開発課題

### TMFCについて

Figure 2に熱式流量センサの構造を示す。ガスが流れるス

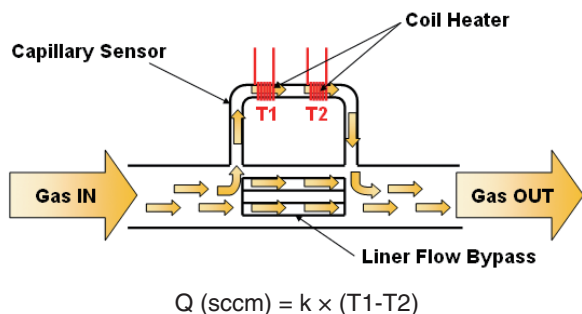


Figure 2 Principle and structure of the thermal flow sensor

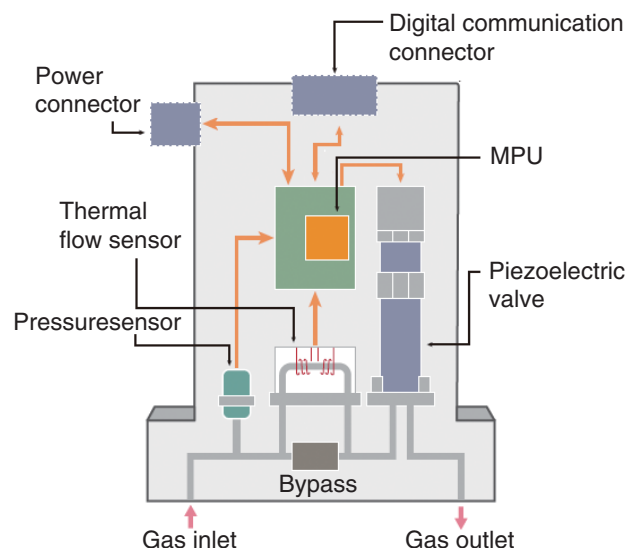


Figure 3 TMFC internal structure

テンレス毛細管の流路上に大きな抵抗温度係数を有する電熱線(Coil Heater)を上流側と下流側に2箇所巻きつけた構造となっている。流量計測は電熱線に電流を流して自己発熱させ、ヒータ線が一定の温度になるよう制御され、ガスの流れによる電熱線の温度分布変化から流量計測を行う。

Figure 3にTMFCの構成を示す。流量計測部がバルブの前段に配置されており、MFCの二次側動作圧力範囲が広いことが特徴となっている。また、熱式流量センサに流れる流量を分流する層流素子抵抗体(以下、バイパス)を搭載し、大流量まで計測可能となっている。

### PMFCについて

PMFCの検出原理は流路に差圧を発生させる圧損体を用い流量を検出する差圧式流量計(Figure 4)である。圧損体は非線形性を有した差圧-流量特性を活用することで、低流量域では高い流量感度特性を得られ流量計測のワイドレンジ化が可能となる。また、差圧を検出する圧力センサは熱式流量センサより応答性にも優れており、流量高速応答化が可能となる。

Figure 5にPMFCの構成を示す。バルブが流量計測部よりも前段にあるためMFCの供給圧力変動に対して高い流量安定性を有している。しかし、高い流量精度を維持するには二次側圧力が低真空以下の条件が必要となる。

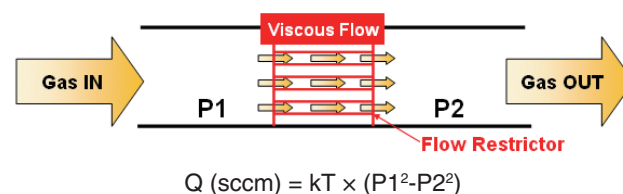


Figure 4 Principle and structure of the pressure flow sensor

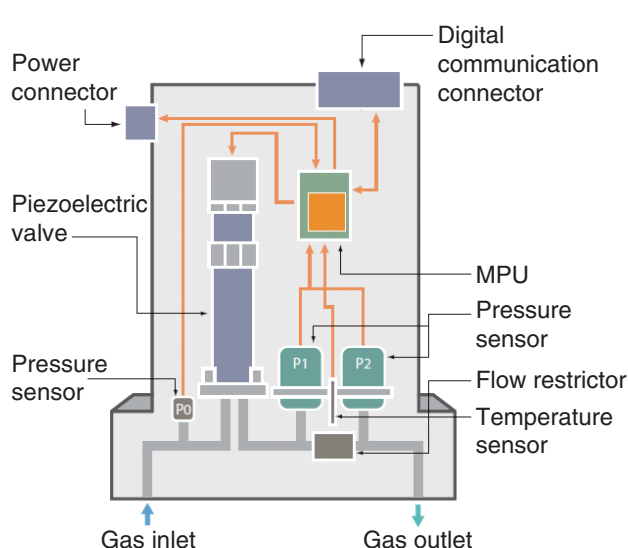


Figure 5 PMFC internal structure

Table 1 Comparison of TMFC and PMFC

Content	TMFC	PMFC
Down stream pressure	○ : Vacuum to Atmosphere	△ : Vacuum to 400Torr
Flow sensor	△ : Heated coil	○ : No heat
Self diagnosis	× : No	○ : Yes
Minimum control range	△ : 2%	○ : 0.2%
Low set-point flow accuracy (2%)	△ : 0.25%	○ : 0.05%
Step up response	△ : 1 sec	○ : 0.8 sec
Step down response	○ : Fast	△ : OK
High flow rate capability	○ : 500SLM	△ : 50SLM
Inlet pressure sensitivity	△ : OK	○ : Good

### TMFCの開発課題について

TMFCとPMFCの比較をTable 1に示す。近年、低流量域での流量精度を求められるプロセスや、流量応答高速化の要求が増えてきており、PMFCの方が優位となってきている。次世代のナノメータースケールの超微細化プロセスに向けたTMFCの開発において技術課題を3つあげ、その技術的解決策について述べる。

1. 流量精度の向上
2. バルブの性能向上
3. 流量応答性能の向上

#### 技術的解決策

##### 1. 流量精度の向上

熱式流量センサは流体の熱流量を検出することで質量流量を計測しており、精度向上の為に巻線とプロセスガス間の熱交換率を高くする必要がある。次世代のTMFCにおいて、熱交換率の向上をコンセプトとし、流量センサの設計パラメータの見直しを行った。

Figure 6に各センサの流量出力特性を示す。熱伝導率の低いSF<sub>6</sub>ガスにおいて、その差は顕著に表れており、新型センサでは熱交換率が向上したことにより、より直線的な特性を得られている。

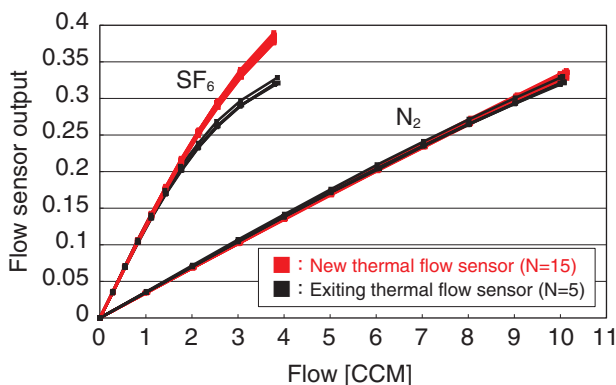
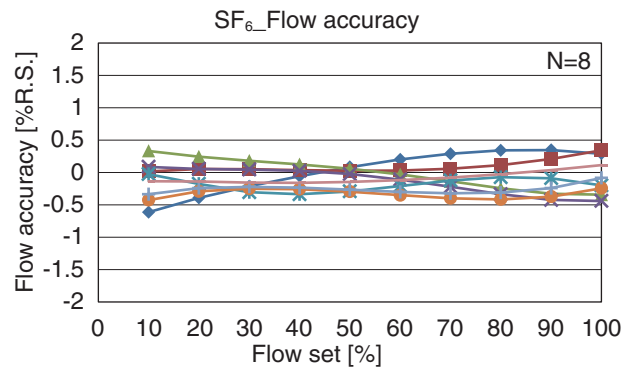
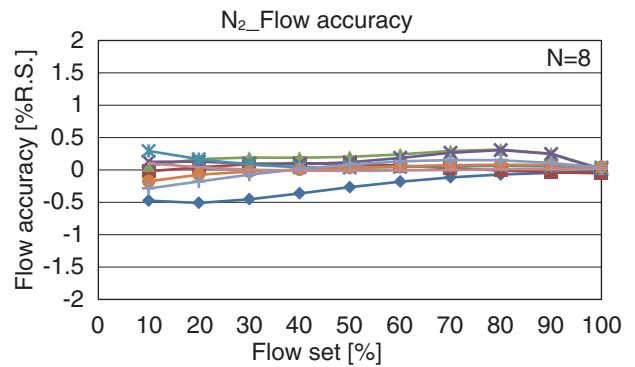


Figure 6 Experimental results of flow output signal



(a) N<sub>2</sub> flow accuracy results



(b) SF<sub>6</sub> flow accuracy results

Figure 7 Experimental results of flow accuracy

現行センサと新型センサの流量精度比較をFigure 7に示す。センサ特性がより直線的になったことで流量精度が改善しており、低設定でも読み値の±1.0%以内を満たす。

##### 2. バルブの性能向上

半導体プロセスでは反応性ガスの滞留などによりバルブの流路壁面に反応生成物が付着し、パーティクルやシートリーク発生の原因となる。バルブにおいても新規設計を行い、接ガス部から駆動部をダイアフラムで隔離し、接ガス部品とデッドボリュームを削減することでパーティクルの付着・発生を抑制する構造となっている。Figure 8に新たな

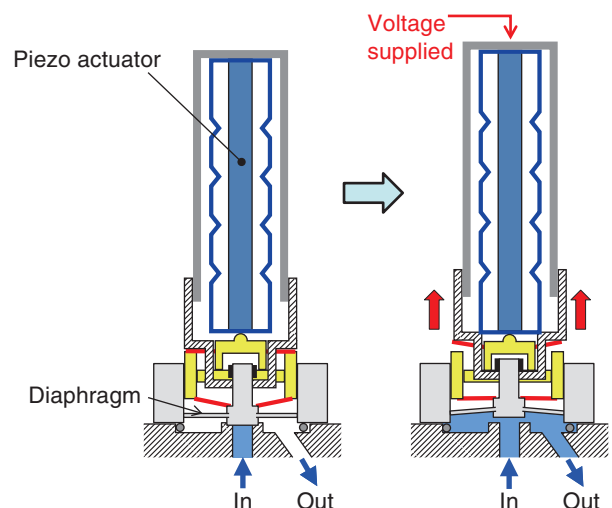


Figure 8 Valve structure

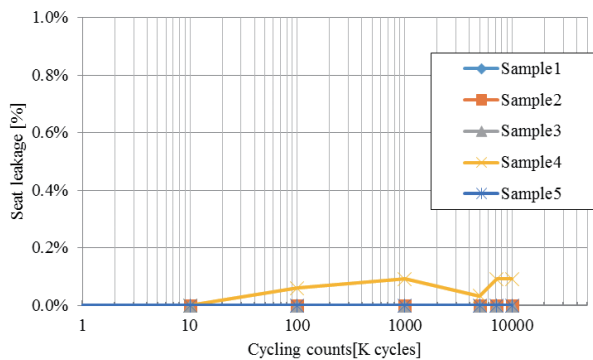


Figure 9 Experimental results of valve seat leakage

なバルブ構造を示す。

また、バルブには高い閉止性と耐久性が求められ、1000万回以上の開閉サイクルにおいてもバルブ閉止性能を維持することが求められる。バルブシート面にはフッ素系樹脂を採用することでシートリーク性能を向上させている。Figure 9にバルブのサイクル試験結果を示す。

### 3. 流量応答性能の向上

半導体装置間の機差低減の要求が高まっており、流量応答性能に対して応答時間やオーバーシュートの器差低減が求められている。流量制御設計にはPID補償を採用し、内部モデル制御 (Internal model control, 以下IMC) の設計法を適用した。Figure 10においてIMCによる制御系設計手法について示す。MFCの制御対象 $G_p(s)$ の出力 $y(s)$ と制御対象モデル $\hat{G}_p(s)$ の出力 $y_M(s)$ を比較し、フィードバック

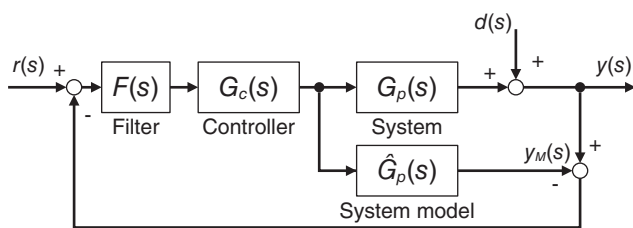


Figure 10 Control system

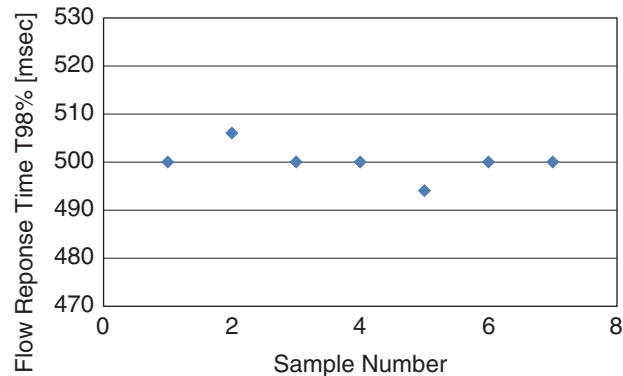


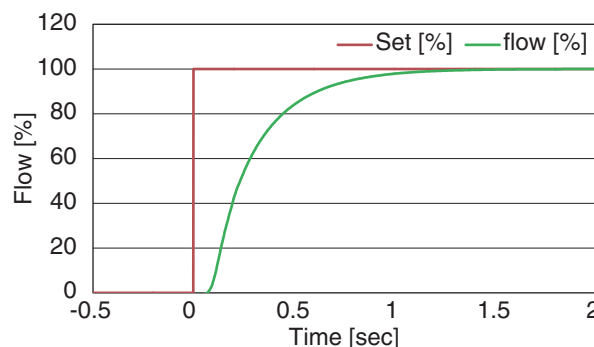
Figure 11 Sample to sample variation of flow response

することでモデル化誤差や外乱 $d(s)$ を補償する。さらに、モデル化誤差の影響を最小限に抑えてロバスト性を向上するため、制御器 $G_c(s)$ にフィルタ $F(s)$ を直列に接続した。

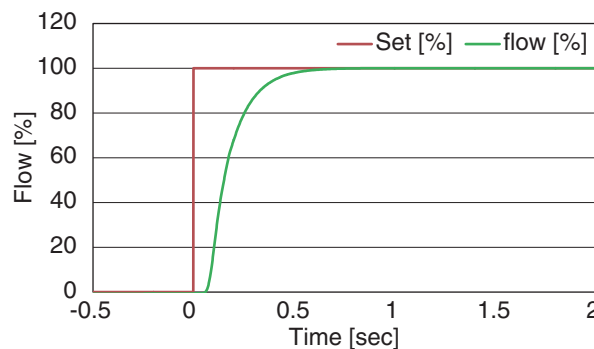
Figure 11に流量応答時間の器差について示す。IMCを適用することで流量応答の98%到達時間のバラツキは $\pm 10$  ms以内の結果となった。

さらに、多様な流量応答時間の要求に対して、独自の制御アルゴリズムにより流量応答時間を設定する機能を有するコントローラを開発した。

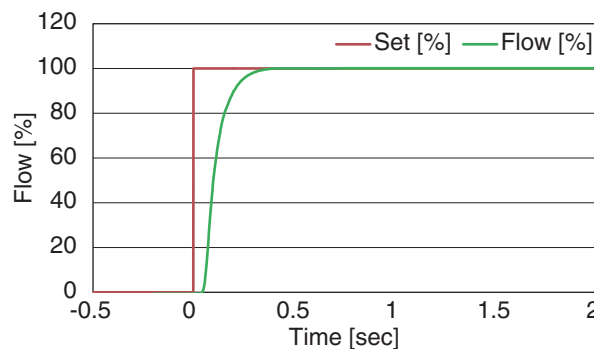
Figure 12では流量応答時間を1000 msec・500 msec・300 msecに設定した結果を示す。なお、流量応答時間は98%到達時間を設定する。



(a) Response time set 1000 msec



(b) Response time set 500 msec



(c) Response time set 300 msec

Figure 12 Step-up flow responses

## おわりに

本稿ではナノメートルスケールの超微細プロセス向けのTMFCのプラットフォームについて述べた。新たに開発されたバルブ・熱式流量センサ・制御アルゴリズムを適用することにより高精度・高速応答を有し、バラツキを抑えた性能を実現することができる。

堀場エステックが流量計測基準の為にMFCを開発してから30年を超える。半導体デバイスの微細化を支えてきたMFCは、また半導体デバイスの微細化の恩恵を受け、CPUを搭載した高機能なデジタルMFCが開発された。半導体の進化と共に歩んできたMFCは本稿で述べた大量のデータを安価に蓄積できる時代を背景に、膨大なデータを製品の品質向上や新規製品開発に活用することが重要と考える。近年ではMFCの生産に対する継続的なバラツキの改善を求められておりMFCの生産で収集されるデータを統計的管理手法(SPC)などにより管理していくことが重要となっている。また、フィールドのデータを活用することで製品の不具合未然防止に活用することも重要である。このようなMFCの多数多様なデータを蓄積し分析することで、技術的課題やニーズを発掘し、MFCの信頼性向上と付加価値を生み出すことが重要と考える。

## 参考文献

- 【1】 家城篤史, “内部モデル制御によるPID補償器の設計法”, *Readout*, 43, 51(2014)
- 【2】 赤土和也, “最先端プロセスを支える技術 CRITERION D500シリーズ”, *Readout*, 43, 54(2014)



### 瀧尻 興太郎

Kotaro TAKIJIRI

株式会社 堀場エステック  
開発本部 開発設計1部  
Development Design Dept. 1  
HORIBA STEC, Co., Ltd.



### 岡野 浩之

Hiroyuki OKANO

株式会社 堀場エステック  
開発本部 開発設計1部  
Development Design Dept. 1  
HORIBA STEC, Co., Ltd.



### 家城 篤史

Atsushi IEKI

株式会社 堀場エステック  
開発本部 開発設計1部  
Development Design Dept. 1  
HORIBA STEC, Co., Ltd.